

令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05011

研究課題名（和文）中東巨大油田地帯に発達する炭酸塩岩油層の地震波減衰・散乱を用いた亀裂特性解明

研究課題名（英文）Fracture characterization in carbonate reservoirs by innovative seismic attenuation and scattering analysis

研究代表者

松島 潤（Matsushima, Jun）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：70282499

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：中東アブダビ油田地帯に発達する亀裂性炭酸塩岩油層で取得された多様で膨大な弾性波探査データに対して、波動工学的な減衰・散乱解析技術を開発・適用することにより減衰・散乱現象を把握し、模擬室内実験による実証的測定を経て、亀裂の特性を解釈するための物理モデル構築を行い、最終的に当該型油層のキャラクタリゼーション手法を体系化に資する研究を行った。アラブ首長国連邦カリファ大学との国際共同研究として実施することにより、各種弾性波探査データ、岩石コアサンプルなどの利用が可能になるとともに、各油田における地球科学的な情報を共有することができ、両大学の強みを活かした相乗効果のもとに実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アラブ首長国連邦は、日本の原油調達先としてはサウジアラビアに次ぐ2番手で、原油輸入量の約25%を占める。日本が自主開発で油田権益を得ている国としては、アブダビがもっとも重要な国として位置付けられている。これまで政府主導で資源外交が進められてきたが、近年世界の資源消費量の拡大、石油・天然ガス資源の国有化の進行により、エネルギー資源の国際需給が逼迫・複雑化してきているとともに、高度な技術スキルが必要となる開発案件が急速に増加しており、資源外交のみならず、大学間における共同研究・教育を含む重層的な関係構築が、我が国における学術進展と長期的な自主開発原油確保に繋がる。

研究成果の概要（英文）：In Abu Dhabi oil fields, geologic and geophysical studies of fractures systems indicate the fracture size on a scale ranging from microns to order of meters. The successful management of fluid monitoring in fractured carbonate rocks significantly depends on comprehensive understanding of fluid path systems in an oil field. In this study, we focus on quantitative interpretation of fluid path systems by developing innovative seismic attenuation and scattering analysis. The present study focused on the establishment of innovative seismic attenuation estimation methods for various seismic data. Furthermore, we proposed a numerical simulation assisted laboratory measurement technology in a core sample, leading to stable attenuation estimation at a broadband frequency range. Rock physics approach for explanation of frequency dependency of attenuation was included.

研究分野：物理探査

キーワード：弾性波減衰・散乱解析 炭酸塩岩 中東巨大油田 CO2-EOR 亀裂 弾性波探査 減衰現象メカニズム 岩石物理モデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

中東産油国であるアラブ首長国連邦のアブダビでは、原油生産の維持・増産を目的として、地震探査データを用いた油層の精緻な貯留層特性把握が課題となっている。とりわけ、CO₂ (二酸化炭素) を地下に圧入し、原油生産量を増進 (EOR: Enhanced Oil Recovery) させる CO₂-EOR 技術の確立が最重要視されており、CO₂ の地下圧入以降の地下の状態 (流体の移動状況) をモニタリングする技術が重要な要素技術に位置づけられている。中東産油国地域特有の炭酸塩岩にはフラクチャー (亀裂) が発達し、フラクチャー型油層を形成している。従って、フラクチャーの基本情報 (亀裂の位置・密度・方向・開口度・充填流体種類・浸透性など) を得るためのキャラクタリゼーション手法の構築と先進的な地震探査による CO₂-EOR モニタリング手法の確立が急務となっている。地震波速度情報を利用した手法はこれまで多くの研究・実フィールドへの適用が行われてきているが、地下の不均質性に起因した波動場の擾乱により速度情報のみの解析では探査結果に不確実性を有している場合が多い。陸上ならびに海上にて巨大油田を有する中東アブダビでは、先進的な地震探査データ取得技術で取得された、多様で膨大な地震探査データの蓄積をしてきているものの、上述の不確実性のためデータの多様化と大量化に比例して油層性状の十分な理解に必ずしも至っていない。そのため、既存の多様で膨大な地震探査データから多様な物性情報を抽出・統合することにより油層性状評価に係る不確実性を軽減し、最終的に高信頼性の CO₂-EOR モニタリング手法を構築するための方法論とその理論的構築が要請されている。

地震波減衰現象のメカニズムについては種々存在するが、固体と流体の相互作用が最も卓越すると考えられており、亀裂と流体との相互作用により生ずる地震波減衰情報を利用して亀裂型炭酸塩岩油層の性状把握することが期待される。さらに、今回の研究では地震波の散乱現象を加味することを考える。亀裂は地震波を散乱させる特性を有していることはこれまで知られていたが、散乱特性を積極的に亀裂性状把握する研究アプローチは極めて少なく、地震波の減衰特性と散乱特性を統合的に解析する手法の開発は地震波を利用した亀裂探査に貢献する。

現象のメカニズムの検証を行うためには、室内実験を用いることが一般的であるが、これまでの室内実験で用いられる超音波周波数領域では、実際のフィールドで用いられる低周波数を説明できないスケールアップの問題が存在しており、これを解決するために室内実験において低周波数実験を確立することが求められている。さらに、室内実験においては各岩石コア全体の平均的な物性が測定されてきており、各岩石コア内に存在する亀裂における地震波応答特性は測定されてこなかったが、各亀裂のこのような特性を求める方法論の確立も必要とされている。

2. 研究の目的

研究期間内に以下の3項目について達成することを目的とする。

- (A) 波動工学的な減衰・散乱解析技術の高度化と実データによる減衰・散乱現象の把握
- (B) 室内実験による減衰・散乱現象の実証的測定
- (C) 減衰・散乱現象を説明する岩石物理学モデルの構築と CO₂-EOR モニタリングの指針策定

3. 研究の方法

- (A) 波動工学的な減衰・散乱解析技術の高度化と実データによる減衰・散乱現象の把握

中東アブダビで取得された3次元反射地震探査データ (10-100Hz)、VSP データ (50-200 Hz)、音波検層データ (500Hz-20kHz) を利用して、研究実施者がこれまで開発してきた減衰解析手法を適用しつつ、さらなる解析技術の高分解能化ならびに高精度化を達成させ、減衰特性の周波数依存性と方位依存性を把握する。地震波減衰現象には、流体と固体の相互作用に起因した内部減衰と不均質性 (地質構造や亀裂など) に起因して生ずる散乱現象による外部減衰 (散乱減衰) に分けることができる。両者を分離することは一般に容易ではないとされているが、広帯域にわたる周波数依存性と方位依存性 (亀裂方向と伝播方向の関係) を利用することにより、両者を分離する手法を構築する。

- (B) 室内実験による減衰・散乱現象の実証的測定

通常の超音波伝播室内実験システム (100kHz 以上) で扱うことが難しいとされている低周波数領域 (各種地震探査・物理検層で使用される周波数領域: 10Hz から数 10kHz 程度) に拡張することにより、地震波減衰・散乱現象の周波数依存性を一元的かつシームレスに測定・分析することを可能にする実験システムを構築することにより、(A) で得られた減衰・散乱特性の周波数依存性と方位依存性を検証する。超音波測定、歪みゲージ測定、共振測定、応力発光測定、微小発生熱測定を複合的に適用し実験の相互検証と不確実性低減を試みるが、特に波動場を可視化して岩石コア内に存在する亀裂における波動特性を解明する手法は、これまで当該分野で適用されてことはなく、波動を用いた室内実験の新しい解析手法の構築に貢献できる。

- (C) 減衰・散乱現象を説明する岩石物理学モデルの構築と CO₂-EOR モニタリングの指針策定

フィールドで取得された各種地震探査データへの減衰・散乱解析、室内実験により得られた結果に対して、Biot 理論に亀裂を考慮した Squirt flow 現象を再現可能な Biot-squirt 理論や inter-

crack flow 理論の適用と拡張を試みることによりモデルの適用性を確認し、CO₂-EOR モニタリング手法の指針を構築する。

4. 研究成果

(A) 波動工学的な減衰・散乱解析技術の高度化と実データによる減衰・散乱現象の把握
(A-1) 音波検層波形データにおいて、地震波インタフェロメトリと CMP 技術により高分解能化と解析安定性を実現する手法を開発し、有力国際誌に論文が掲載された。

(A-2) 音波検層波形データならびに VSP 地震探査データにおいて、周波数領域上の特徴を利用することにより散乱減衰と内部減衰を分離する手法を開発し、有力国際誌に論文が掲載された。また、当該手法をアブダビ陸上油田で取得された実データに適用した結果が有力国際誌に論文が掲載された。

(A-3) アブダビ陸上油田において取得された VSP 地震探査データを用いて、粘土層が卓越した層(炭化水素流体の流れを規制する性質を有する)の地震波減衰特性を世界で初めて明らかにし、有力国際誌に論文が掲載された。

(A-4) 三次元 VSP 地震探査データを用いることにより方位角に依存する P 波弾性波減衰特性を抽出する手法を開発し、当該手法をアブダビ陸上油田で取得された実データに適用した。亀裂性炭酸塩岩貯留層の減衰異方性を抽出し物理的解釈を行った。その成果は論文として有力国際誌に掲載された。

(A-5) Walkaway VSP 地震探査データを用いることにより S 波弾性波減衰特性を抽出する手法を開発し、海域(国内メタンハイドレート賦存海域)で取得された実データに適用した。海底面で P 波から S 波に変換する波の S/N 比を向上させることにより良好な S 波弾性波減衰特性が得られ、有力国際誌に論文が掲載された。

(A-6) 三次元 VSP 地震探査データを用いることにより地中で変換する S 波を抽出する技術を開発し、変換 S 波を用いた弾性波減衰解析法を確立した。当該手法をアブダビ陸上油田で取得された三次元 VSP 地震探査データに適用した。亀裂性炭酸塩岩貯留層の S 波減衰特性を安定的に導出し、さらに異なる周波数帯域を有する S 波音波検層データにより導出された S 波減衰特性と比較することにより周波数依存性を確認し、その特性について亀裂と波動との相互作用を考慮して減衰メカニズムの仮説を立てた。その成果は論文として有力国際誌に投稿した。

(A-7) 三次元海底ケーブル地震探査データ(OBC データ)と VSP データとを組み合わせることにより、従来解析が困難とされていた地震探査周波数帯域における P 波弾性波減衰特性を抽出する手法を開発した。アブダビ海上油田で取得された実データに適用し、従来法に比較して良好な結果を得た。その成果は論文として有力国際誌に投稿した。

(B) 室内実験による減衰・散乱現象の実証的測定

(B-1) コア試料において 3 次元 X 線 CT を適用して得られる 3 次元デジタルコアに対して、弾性波動シミュレーションを行い、その波形から 3 次元歪み分布を得ることにより間接的に減衰の広帯域周波数依存性を評価する手法を提案しその高度化を行った。この手法は数十メートルを有する波長であっても数ミリメートルの歪みを検出することができ、亀裂のマクロメカニクスと波動との相互作用を定量的に評価できる手法である。数値シミュレーションにより手法の有効性を確認し、アブダビ陸上油田で取得された 50 種類のコア試料に対して適用して有効性を示した。その成果を論文として有力国際誌に掲載された。

(C) 減衰・散乱現象を説明する岩石物理学モデルの構築と CO₂-EOR モニタリングの指針策定

(C-1) Biot 理論に亀裂を考慮した Squirt flow 現象を再現可能な Biot-squirt 理論を考慮した複数の岩石物理モデルをプログラム化し、まずは適用性が容易なメタンハイドレート層や部分凍結した砂岩層に適用することにより最適なモデルを示し、有力国際誌に論文が 2 編掲載された。

(C-2) 弾性減衰現象の理論的扱いについてはこれまで岩石物理モデルに基づいて実施されてきたがミクロスケールの状況を考慮することができなかったが、有限要素法を用いたミクロスケールを考慮したシミュレーション技術による流体で満たされた亀裂と波動との相互作用を解明する手法を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsushima, J., M.Y. Ali, F. Bouchaala	4. 巻 224
2. 論文標題 Propagation of waves with a wide range of frequencies in digital core samples and dynamic strain anomaly detection: Carbonate rock as a case study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 340-354
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggaa467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Bouchaala Fateh, Ali Mohammed Y., Matsushima Jun, Bouzidi Youcef, Takam Takougang Eric M., Mohamed Aala A. I., Sultan Akmal	4. 巻 84
2. 論文標題 Azimuthal investigation of compressional seismic-wave attenuation in a fractured reservoir	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 GEOPHYSICS	6. 最初と最後の頁 B437 ~ B446
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1190/geo2019-0079.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhan Linsen, Matsushima Jun	4. 巻 84
2. 論文標題 Rock-physics modeling of ultrasonic P- and S-wave attenuation in partially frozen brine and unconsolidated sand systems and comparison with laboratory measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 GEOPHYSICS	6. 最初と最後の頁 MR153 ~ MR171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1190/geo2018-0408.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsushima Jun, Zhan Linsen	4. 巻 173
2. 論文標題 S-wave attenuation estimation from walkaway vertical seismic profiling data in methane hydrate-bearing sediments at Nankai Trough, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 103931 ~ 103931
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jappgeo.2019.103931	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsushima, J., M.Y. Ali, F. Bouchaala	4. 巻 83
2. 論文標題 Attenuation estimation from sonic logging waveforms combining seismic interferometry and common mid-point approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysics	6. 最初と最後の頁 WA21-WA35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1190/GE02017-0100.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bouchaala, F., M.Y. Ali, J. Matsushima	4. 巻 15
2. 論文標題 Detailed study of seismic wave attenuation from four oilfields in Abu Dhabi, United Arab Emirates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysics and Engineering	6. 最初と最後の頁 106-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-2140/aa9a08	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhan, L. and J. Matsushima	4. 巻 214
2. 論文標題 Frequency-dependent P-wave attenuation in hydrate-bearing sediments: a rock physics study at Nankai Trough, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1961-1985
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggy229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bouchaala, F., M.Y. Ali, J. Matsushima, Y. Bouzidi, E.M.T. Takougang, A.A.I. Mohamed and A.A. Sultan	4. 巻 174
2. 論文標題 Scattering and intrinsic attenuation as a potential tool for study of a fractured reservoir	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Petroleum Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 533-543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.petrol.2018.11.058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bouchaala, F., M.Y. Ali, J. Matsushima	4. 巻 84
2. 論文標題 Attenuation study of a clay-rich dense zone in fractured carbonate reservoirs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysics	6. 最初と最後の頁 B205-B216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1190/GE02018-0419.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Fateh Bouchaala, Mohammed Y Ali, Jun Matsushima, Youcef Bouzidi, Eric M Takam Takougang, Aala Al Mohamed
2. 発表標題 New workflow for estimating seismic wave attenuation from 3D OBC data
3. 学会等名 SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Bouchaala, F., Ali, M. Y., Matsushima, J., Bouzidi, Y., Takam Takougang, E. M., & Mohamed, A. A
2. 発表標題 Study of a fractured reservoir by using the anisotropy of seismic wave attenuation
3. 学会等名 SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bouchaala, F., Ali, M.Y., Matsushima, J., Bouzidi, Y., Takougang, E.T. and Mohammed, A.A.
2. 発表標題 November. New Workflow for Estimating Seismic Wave Attenuation from 3D Surface Seismic Data
3. 学会等名 Fifth EAGE Workshop on Borehole Geophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松島潤, アリモハメド, ブチャラファテ
2. 発表標題 数値地震波形を使用したデジタルコア試料のひずみ異常検出
3. 学会等名 公益社団法人物理探査学会第140回学術講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松島潤, アリモハメド, ブチャラファテ
2. 発表標題 デジタル岩石コア試料の動的ひずみ異常検出による広周波数帯域の弾性波減衰特性解明 --- 3次元解析と可視化
3. 学会等名 公益社団法人物理探査学会第141回学術講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bouchaala, F., Ali, M.Y. and Matsushima, J.
2. 発表標題 A fractured reservoir in the light of seismic wave attenuation attribute
3. 学会等名 RDPETRO 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Matsushima J., Ali MY, Bouchaala F, Takubo, K., Hatahori, T., Wang, B., and Takatsubo, J.
2. 発表標題 Experimental investigation of broadband frequency response of fractures in a carbonate core by visualizing seismic wave propagation
3. 学会等名 The 13th SEGJ International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bouchaala, F., M.Y. Ali, Y. Bouzidi, J. Matsushima, E.M.T. Takougang, W. Liu, A.A.I. Mohamed and A.A. Sultan
2. 発表標題 Potential of intrinsic and scattering attenuation for the investigation of a fractured reservoir
3. 学会等名 The 13th SEGJ International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松島潤, アリモハメド, プチャラファテ
2. 発表標題 3次元 X 線 CT により得られたデジタルコア試料における 3次元波動伝播シミュレーション
3. 学会等名 物理探査学会第138回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 詹林森, 松島潤
2. 発表標題 Broadband frequency dispersion and attenuation of P-wave and S-wave in partially frozen brine and unconsolidated sands: a rock physics study
3. 学会等名 物理探査学会第139回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松島潤
2. 発表標題 地震波探査データから導かれる地下情報の不確実性についての考察
3. 学会等名 物理探査学会第139回学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
アラブ首長国連邦	Khalifa University			